



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
GSE.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO –VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE**

**TECNOLOGIAS DE INFRAVERMELHO E ULTRAVIOLETA APLICADAS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO**

**Laerte dos Santos (\*)  
FURNAS**

**Marcelo O. M. Filho  
FURNAS**

**Rodolfo V. Silva  
FURNAS**

**Edison C. Bortoni  
UNIFEI**

**RESUMO**

Este artigo faz um paralelo entre duas tecnologias de geração de imagem, a Termografia Infravermelha e a Detecção de Corona por Ultravioleta, as quais estão sendo muito utilizadas no setor elétrico como ferramentas de manutenção preditiva. É discutido como cada tecnologia opera, onde e como podem ser aplicadas em sistemas elétricos de alta tensão, quais suas limitações e os resultados possíveis de se obter através de cada uma delas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Infravermelho, ultravioleta, alta tensão, termografia, detecção de corona por UV.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Devido à necessidade crescente de um Sistema Elétrico operar com segurança e continuamente, técnicas de manutenção preditiva, capazes de detectar defeitos em suas fases iniciais e possibilitar uma adequada programação da manutenção, têm sido cada vez mais empregadas. Em equipamentos de alta tensão, técnicas de inspeção sem contato, que possuam a capacidade de inspecionar a uma distância segura e sem interferir na produção são as mais indicadas. Dentre estas técnicas está a inspeção visual, o mais antigo método de inspeção utilizado, de simples realização e de baixo custo operacional, mas que apesar de suas vantagens não é capaz de detectar diversos fenômenos que ocorrem em equipamentos elétricos de alta tensão e que produzem radiações fora do espectro visível. Fenômenos que podem indicar defeitos em suas fases iniciais ou mesmo em estágios mais avançados, prestes a provocarem paradas na produção e/ou danos à vida humana. A Termografia Infravermelha e a Detecção de Corona por Ultravioleta são duas tecnologias que possibilitam a detecção e a visualização de radiações fora do espectro visível e podem, se utilizadas com critério e conhecimento, aumentar consideravelmente a confiabilidade do Sistema Elétrico.

**2.0 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

A Termografia Infravermelha e a Detecção de Corona por Ultravioleta são duas tecnologias que têm muito em comum: podem ser aplicadas em sistemas elétricos de potência como ferramentas de manutenção preditiva, possibilitam a inspeção com os equipamentos em operação e a uma distância segura e empregam instrumentos ópticos capazes de detectar, processar e gerar imagens da radiação eletromagnética capturada. A diferença básica está na faixa de comprimento de onda da radiação em que elas operam [2]. A Termografia Infravermelha na faixa de infravermelho, com comprimentos de onda mais longos que a radiação visível e a Detecção de Corona por Ultravioleta na faixa de ultravioleta do espectro eletromagnético e com comprimentos de onda mais curtos que a visível. Ambas formam, respectivamente, o limite inferior e superior da faixa visível ao olho humano, que fica entre 0,4  $\mu\text{m}$  e 0,7  $\mu\text{m}$ , como mostra a Figura 1.

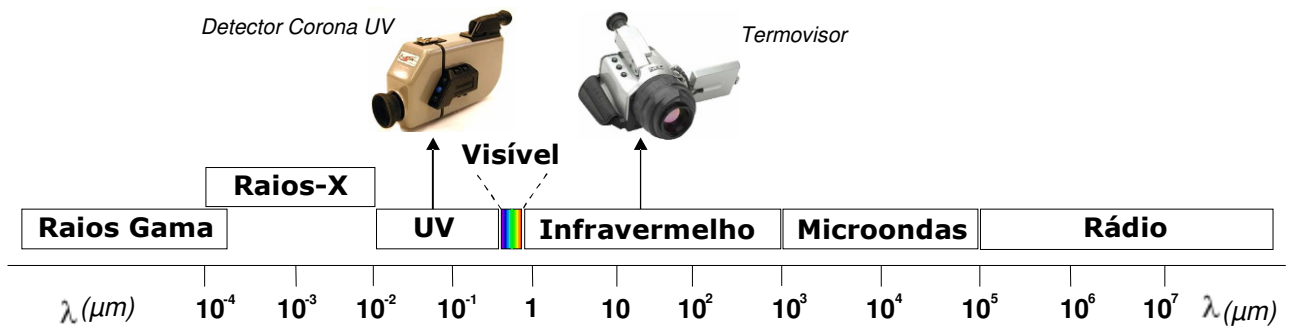


FIGURA 1 - Espectro Eletromagnético

### 2.1 Termografia Infravermelha

Todos os objetos acima do zero absoluto (0 K ou  $-273,16^\circ\text{C}$ ) emitem radiação térmica devido à agitação térmica de átomos e moléculas dos quais são constituídos. Quanto maior essa agitação, mais quente se encontra o objeto e mais radiação térmica ele emite. Segundo a lei de Stefan-Boltzmann a radiação total  $M$  ( $\text{W}/\text{M}^2$ ) emitida por um corpo cresce com a quarta potência de sua temperatura  $T$  (K):

$$M = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (1)$$

A radiação térmica emitida pelos objetos pode estar nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e até na faixa de microondas do espectro eletromagnético e o comprimento de onda  $\lambda_{m\acute{a}x}$  ( $\mu\text{m}$ ), no qual ocorre a máxima radiação emitida pelo objeto, depende de sua temperatura e pode ser calculado pela equação abaixo:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898}{T} \quad (2)$$

Para temperaturas típicas encontradas em equipamentos elétricos de alta tensão e associadas ao efeito Joule, a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho. Falhas ocorridas nesses equipamentos, geralmente são precedidas de uma anormalidade térmica, alterando a taxa de radiação emitida. Esses fenômenos físicos motivam a aplicação da termografia em sistemas elétricos, uma vez que, através de um instrumento chamado termovisor, a radiação infravermelha emitida pelo objeto inspecionado (sem a necessidade de contato) é detectada e transformada em imagens térmicas visíveis (chamadas de termogramas) com a possibilidade de convertê-la em leituras de temperatura. Nos termogramas, diferentes cores representam diferentes temperaturas. Geralmente, cores mais claras indicam temperaturas mais altas [1].

A Figura 2 apresenta o esquema simplificado de um termovisor e a Figura 3 um exemplo da conversão da imagem visível em imagem térmica.

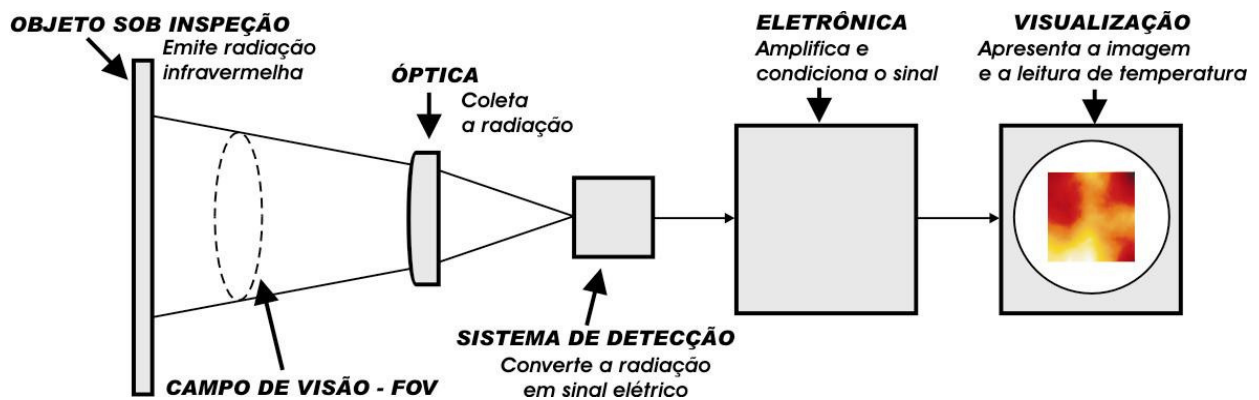


FIGURA 2 – Esquema simplificado de um termovisor

Equipamento sob inspeção – Imagem Visível



Radiação  
Infravermelha



Imagem térmica - Termograma

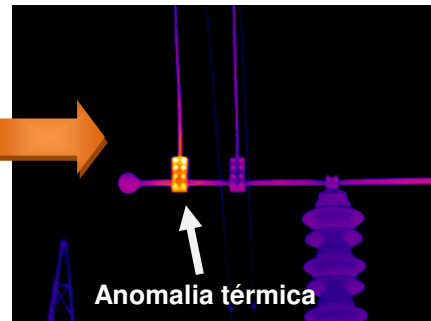


FIGURA 3 – Conversão da imagem visível em imagem térmica através da termografia.

## 2.2 Detecção de Corona por Ultravioleta (UV)

A inspeção através da Detecção de Corona por UV se fundamenta em outro fenômeno físico denominado de efeito Corona. O efeito Corona é definido como sendo um tipo de descarga elétrica localizada, resultante da ionização transitória de gases em um sistema de isolamento quando a tensão aplicada excede um valor crítico  $V_0$  (kV/cm). Quando esta ionização ocorre no ar, o valor crítico, ou seja, a tensão disruptiva varia com as condições atmosféricas, sendo proporcional à densidade relativa do ar  $\delta$  [4]:

$$\delta = \frac{3,9211 \times P}{T} \quad (3)$$

P – pressão barométrica (cmHg);  
T – temperatura ambiente (K).

O início do efeito corona acontece a partir da tensão:

$$V_0 = E_0 \times \delta \times r \times m \times \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (4)$$

$E_0$  – capacidade disruptiva do ar (kV/cm) = 21,1 kV/cm em 25 °C e 76 cmHg;

$r$  – raio do condutor (cm);

$D$  – espaçamento entre as fases (cm);

$m$  – fator de irregularidade (rugosidade) do condutor;

$\delta$  – Densidade relativa do ar.

Durante o processo de ionização, os elétrons do gás ganham e liberam energia continuamente. Quando os elétrons liberam energia, ondas de luz são emitidas. O comprimento de onda dessa luz está relacionado ao gás que está sendo ionizado. No caso do ar, que contém cerca de 80% de gás nitrogênio, seu espectro de luz é em sua maior parte ultravioleta (UV) como pode ser observado na Figura 4.

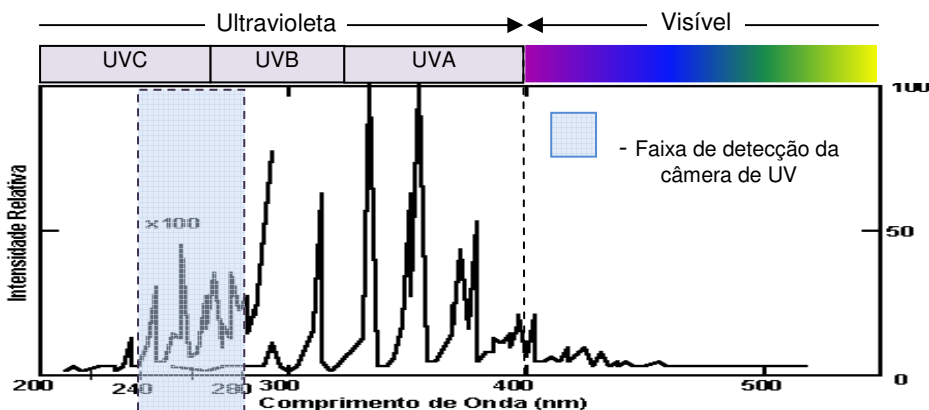


FIGURA 4 - Emissão espectral de uma descarga de corona no ar

A tecnologia de Detecção de Corona por Ultravioleta explora o fato de o efeito corona emitir radiação ultravioleta. Através da detecção dessa radiação, simultaneamente com a detecção da radiação visível é gerada uma imagem composta, na qual se pode observar a exata origem do efeito corona. A câmera de Detecção de Corona por UV opera na faixa de 240 a 280 nm. Embora nessa faixa a intensidade do sinal de corona seja mais fraca que na faixa de 290 a 400 nm (como pode ser visto na Figura 4) é possível obter um melhor contraste de imagem devido a ausência de interferência da radiação solar. Radiações ultravioletas emitidas pelo Sol com comprimento de onda menor que 290 nm são absorvidas pela atmosfera. Nessa faixa é possível realizar inspeções durante o dia sem interferência da radiação UV do Sol. A Figura 5 mostra um típico diagrama de um Detecor de Corona por UV e na Figura 6 é mostrado um exemplo de aplicação.

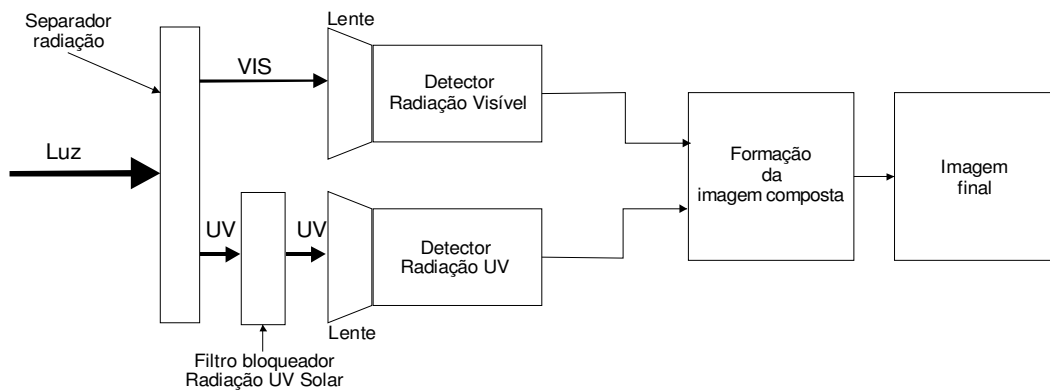


FIGURA 5. Esquema simplificado de um Detecor de Corona por Ultravioleta



FIGURA 6 – Combinação da imagem visível e da radiação UV pela Detecção de Corona por UV.

Devido ao alto campo elétrico, equipamentos de alta tensão podem gerar corona. A atividade de corona nestes equipamentos pode indicar falhas de projeto ou de funcionamento, causar perda de potência ativa, corrosão e degradação acelerada de isoladores poliméricos e cerâmicos. Além disso, o efeito corona gera ruído audível, rádio interferência e TV interferência.

### 3.0 - APLICAÇÕES

Como descrito anteriormente, a Termografia Infravermelha detecta a radiação infravermelha proveniente do equipamento sob inspeção. Em equipamentos elétricos, anomalias térmicas estão relacionadas com o efeito Joule, portanto, à corrente circulante. No caso da Detecção de Corona por UV, a detecção da radiação ultravioleta não depende da corrente circulante, mas sim da tensão aplicada. Deste modo, são ferramentas que além de operarem em diferentes faixas do espectro, avaliam efeitos físicos distintos. Portanto, a termografia é uma ferramenta útil na detecção de defeitos relacionados à alta resistência elétrica, curto circuitos, circuitos abertos, aquecimento indutivo, harmônicos, desbalanceamento de carga, sobrecarga e componentes instalados incorretamente. Por outro lado, a Detecção de Corona por UV pode detectar problemas em equipamentos mesmo quando não existe corrente circulante, apenas tensão aplicada. Por exemplo: contaminação, trinca e perfuração em isoladores, cabos com tentos rompidos, isolamentos danificados, instalação imprópria e defeitos em anéis de corona. Conseqüentemente, a aplicação conjunta dessas duas tecnologias, na manutenção preditiva de sistemas elétricos de alta tensão, amplia de forma significativa os resultados alcançados na busca da confiabilidade do Sistema.

### 3.1 Eventos detectados utilizando a Termografia

Abaixo são apresentados exemplos de fenômenos que não emitem radiação na faixa do visível e nem do ultravioleta, mas podem ser detectados na faixa do infravermelho do espectro, Figura 7

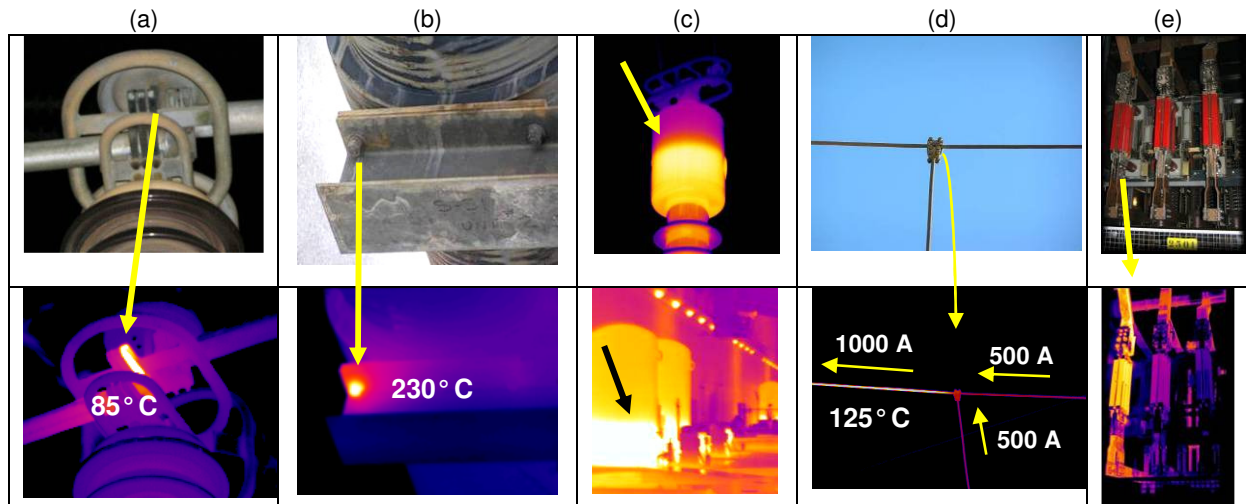


FIGURA 7 – Exemplos de fenômenos que emitem radiação na faixa do infravermelho:

- chave seccionadora apresentando alta resistência de contato
- Aquecimento indutivo em parafuso da estrutura que sustenta o barramento de saída do gerador
- Visualização do nível de óleo em equipamentos e tanques
- Sobrecarga em cabos de uma subestação de 138 kV
- Desbalanceamento de corrente acarretando sobrecarga em uma das fases de uma chave seccionadora

### 3.2 Eventos detectados utilizando a Detecção de Corona por UV

A seguir são apresentados exemplos de fenômenos que geralmente não emitem radiação na faixa do visível e nem do infravermelho, mas podem ser detectados na faixa do ultravioleta do espectro, Figura 8.

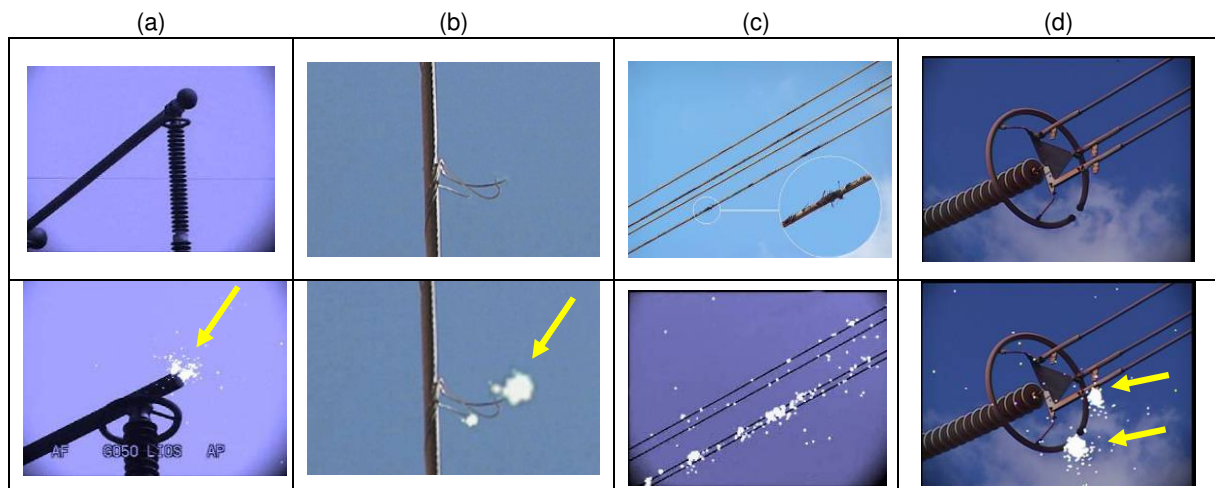


FIGURA 8 – Exemplos de fenômenos que podem ser detectados na faixa do ultravioleta do espectro:

- Barramentos de uma subestação de 500 kV, com e sem a esfera anticorona
- Cabo de alta tensão (ASCR) com tentos rompidos
- Cabos de uma linha de transmissão de 750 kV sujos
- Anel anticorona danificado e instalação imprópria de terminais - 500 kV

### 3.3 Eventos detectados tanto pela Termografia quanto pela Detecção de Corona por UV

Alguns fenômenos além de gerarem aquecimento, produzem descargas parciais, logo, emitem radiação na faixa do infravermelho e ultravioleta simultaneamente.

Estes fenômenos podem ser visualizados, tanto pela Termografia, quanto pela Detecção de Corona por UV, como mostram os exemplos abaixo.

A Figura 9 apresenta em (a) a vista geral de uma torre onde uma cadeia de isoladores de vidro, que se encontra poluída, é visualizada na região do ultravioleta (b) e na região do infravermelho (c).

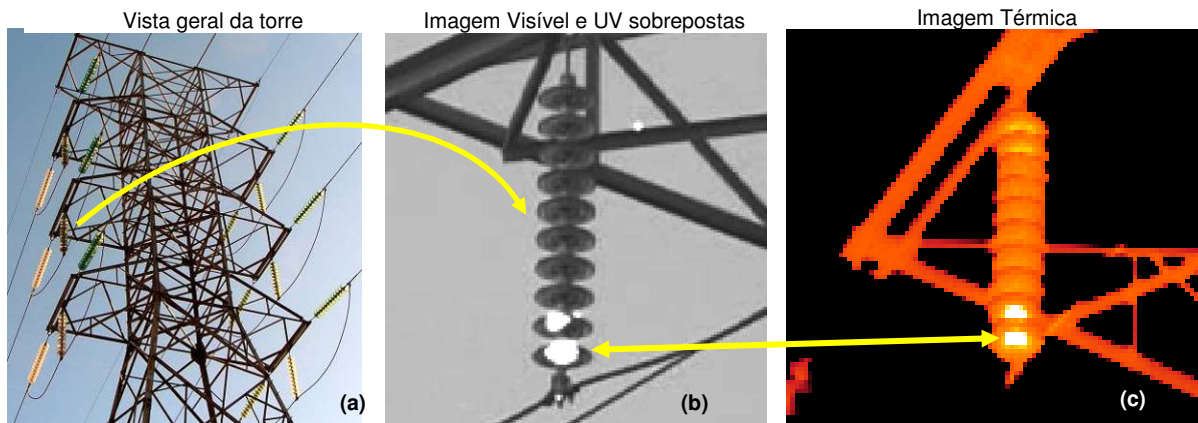


FIGURA 9 – Cadeia de isoladores de vidro, em linha de 345 kV, atacada por poluição ambiental

As imagens da Figura 10 são resultado de uma inspeção em um gabinete de 13,8 kV (a). O isolamento entre o gabinete e os barramentos das fases ABC apresentou “trilhas” de baixa isolamento provocando fuga de corrente para terra e conseqüente aquecimento (b). Com a redução da isolação, descargas parciais começaram a ser geradas (c).

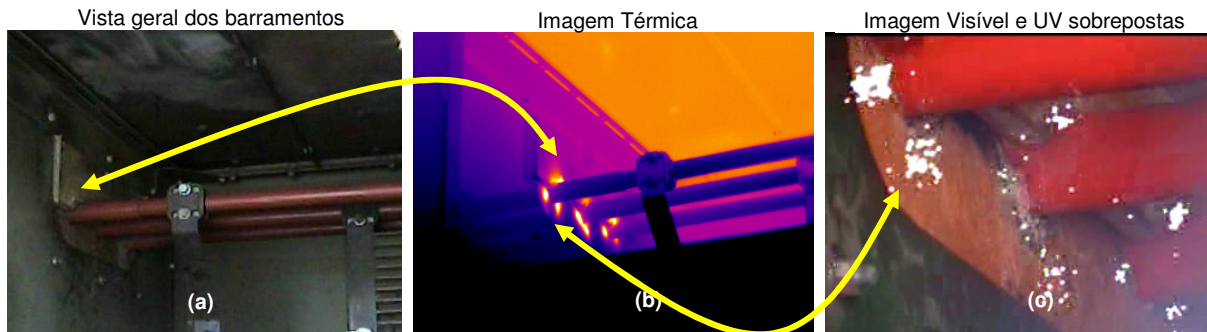


FIGURA 10 – Isolamento de barramento de 13,8 kV corrompido

## 4.0 - LIMITAÇÕES NA APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE TERMOGRAFIA E DETECÇÃO DE CORONA POR UV

Basicamente, as limitações que envolvem a aplicação das duas técnicas podem ser definidas como:

- Limitação de capacitação individual
- Limitação técnica
- Limitação ambiental

### 4.1 Limitação de capacitação individual

A limitação de capacitação individual está relacionada à pessoa que faz a inspeção, ou seja, o inspetor. Essa talvez seja, dentre as limitações, a mais significativa.

Por serem tecnologias de geração de imagem, a Termografia e a Detecção de Corona por UV dão a falsa impressão de serem de aplicação muito simples. Assim como ocorre com nossa visão, o desconhecimento de certos fenômenos físicos pode levar a conclusões equivocadas na análise das imagens. Deste modo, muitos

inspetores com pouco conhecimento e pouca experiência se julgam especialistas no assunto. Em uma situação como esta, os resultados alcançados podem ser muito diferentes dos esperados. É extremamente importante que o inspetor tenha conhecimento sobre a operação e as características do Termovisor/Detector de Corona utilizado, assim como do funcionamento dos equipamentos a serem inspecionados. Ele deve ter ciência da forte influência das condições ambientais na inspeção e deve conhecer a teoria básica que envolve os fenômenos físicos observados. Esses conhecimentos são essenciais para uma análise correta das imagens e da avaliação do desempenho dos equipamentos sob inspeção.

Em suma, para se obter resultados consistentes, o inspetor deve ter um alto nível de treinamento e conhecimento e ser capacitado para a inspeção. Assim ele poderá ser capaz de detectar o máximo de falhas possíveis e discernir entre um defeito real e uma falsa anomalia, o que pode economizar milhares de Reais em paradas não programadas e/ou paradas e manutenções desnecessárias.

#### 4.2 Limitação Técnica

A limitação técnica envolve:

- As características técnicas do instrumento utilizado (termovisor ou Detector de UV)
- As condições técnicas do equipamento sob inspeção

##### 4.2.1 Características técnicas do instrumento de inspeção

A escolha correta do instrumento de inspeção tem reflexo direto nos resultados que podem ser obtidos. Características técnicas, como as descritas abaixo, devem ser observadas de acordo com a aplicação específica.

- Portabilidade
- Óptica (lentes, campo de visão, etc.)
- Detector (tipo, sensibilidade, etc.)
- Memória para registro das imagens (interna, externa, capacidade)
- Apresentação da imagem (monitor, visor, resolução)
- Pós-processamento (análise e emissão de relatórios)

##### 4.2.2 Condições técnicas do equipamento sob inspeção

O bom resultado da inspeção depende, em grande parte, do conhecimento do funcionamento do equipamento sob inspeção e do comportamento de seus componentes. Sem esse conhecimento, torna-se difícil determinar o que está dentro da normalidade e o que é um problema. Portanto, influências relacionadas ao equipamento sob inspeção, como as relacionadas a seguir devem ser levadas em consideração.

- Condição da superfície do equipamento (Termografia: emissividade, Detector de Corona: saliências, sujeira)
- Corrente de carga (Termografia)
- Tensão aplicada (Detector de Corona)
- Distância e tamanho da fonte que está gerando a anomalia (radiação emitida)
- Visada direta ou indireta da fonte da anomalia.

#### 4.3 Limitação Ambiental

O ambiente em que é realizada a inspeção pode alterar consideravelmente os resultados obtidos e, se não ponderado, levar a diagnósticos equivocados.

Dentro da limitação ambiental pode-se listar:

- Temperatura ambiente
- Atenuação atmosférica
- Umidade/precipitação
- Radiação solar
- Vento
- Altitude (pressão atmosférica)

Os fatores ambientais como a temperatura ambiente, umidade/precipitação, radiação solar e vento podem afetar de maneiras diferentes a distribuição térmica dos componentes afetando a inspeção termográfica. Esses mesmos fatores, mais a altitude influenciam também na detecção de corona, mas de modo particular. Já a atmosfera,

dependendo da distância e de suas condições, pode atenuar a quantidade de radiação que sai da fonte da anomalia, até chegar aos detectores dos instrumentos de inspeção.

## 5.0 - CONCLUSÃO

A Termografia Infravermelha já está em uso, no setor elétrico, há mais de três décadas. É uma técnica consolidada e sua aplicação cresce ano após ano. Já a Detecção de Corona por UV é uma técnica relativamente nova e seus resultados no setor elétrico vêm crescendo com o aumento de estudos e pesquisas demonstrando suas possibilidades. Para um setor que não se pode dar o luxo de parar, como é o setor elétrico, técnicas que permitam inspecionar sem interferir na produção são bem recebidas. O uso combinado dessas duas tecnologias possibilita estender o espectro da visão humana e visualizar fenômenos, indicativos de defeito, que antes não podiam ser percebidos a olho nu, deste modo amplia-se a gama dos defeitos que podem ser detectados e, por consequência, aumenta-se a confiabilidade do Sistema.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 – SANTOS, L., “*Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas*”; Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2006.

2 – SANTOS, L., SANTOS D. F.; BORTONI E. C.; “*Estendendo a Visão Humana além do Espectro Visível para Aprimorar a Detecção de Falhas em Equipamentos de Alta Tensão*”; V CORENDE – Patagonia, Argentina, 2005

3 – BEZERRA, J. M. B.; “*Poluição em Cadeias de Isoladores: Técnicas de Monitoração*”; Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, 2002.

4 – BANDYOPADHYAY, M. N.; “*Electrical Power Systems – Theory and Practice*”; Prentice Hall of India, 2006.

5 – LINDNER, M.; ELSTEIN, S.; LINDNER, P.; TOPAZ, J. M.; PHILLIPS, A. J.; “*Daylight Corona Discharge Imager*”; High Voltage Engineering Symposium, IEE 1999.